

УДК 621.396.4

## **The Experimental Researches of Electrical Characteristics of the Gaas MIC Low-Noise Amplifier and the Switch-Off of Own Production for Equipment of Autonomous Spacecraft Radionavigation**

**Vadim N. Shkolniy<sup>a\*</sup>, Sergey B. Suntsov<sup>a</sup>,  
Aleksey V. Kondratenko<sup>b</sup>, Dmitriy A. Shishkin<sup>b</sup>,  
Vladimir D. Dmitriev<sup>b</sup> and Vadim M. Karaban<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems  
52 Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia*

<sup>b</sup>*TUSUR*

*40 Lenina Str, Tomsk, 634050, Russia*

Received 20.02.2015, received in revised form 04.03.2015, accepted 27.03.2015

*The presents of electrical characteristics experimental researches results of the radiation-hardened on-off switch and low-noise amplifier (LNA) monolithic integrated circuits (MIC) of the designed and manufactured based on arsenide-gallium technology of own production for use in the multi-channel on-board navigation receivers of global navigation satellite systems (GNSS) signals for autonomous coordinate and time support of all types orbits spacecraft.*

*Keywords: semiconductors, nanoheterostructures, arsenide-gallium technology, monolithic integrated circuits, spacecraft, autonomous navigation, on-off switch, low noise amplifier, experimental researches, electrical characteristics.*

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

\* Corresponding author E-mail address: [shkolniy@iss-reshetnev.ru](mailto:shkolniy@iss-reshetnev.ru)

## **Экспериментальные исследования электрических характеристик арсенид-галлиевых МИС малошумящего усилителя и двухпозиционного коммутатора собственного производства для аппаратуры автономной радионавигации космических аппаратов**

**В.Н. Школьный<sup>а</sup>, С.Б. Сунцов<sup>а</sup>, А.В. Кондратенко<sup>б</sup>,  
Д.А. Шишкин<sup>б</sup>, В.Д. Дмитриев<sup>б</sup>, В.М. Карабан<sup>б</sup>**

*<sup>а</sup>АО «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М.Ф. Решетнёва»*

*Россия, 662972, Красноярский край, Железногорск, ул. Ленина, 52*

*<sup>б</sup>Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 40*

---

*Представлены результаты экспериментальных исследований электрических характеристик радиационностойких монолитно-интегральных схем двухпозиционного коммутатора и малошумящего усилителя, разработанного и изготовленного на основе арсенид-галлиевой технологии собственного производства для применения в составе бортовых многоканальных навигационных приёмников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем космических аппаратов всех типов орбит для их автономного координатно-временного обеспечения.*

*Ключевые слова: полупроводники, наногетероструктуры, арсенид-галлиевая технология, монолитные интегральные схемы, космический аппарат, автономная навигация, двухпозиционный коммутатор, малошумящий усилитель, экспериментальные исследования, электрические характеристики.*

---

### **Введение**

Координатно-временное обеспечение является одним из важнейших условий успешного функционирования космических аппаратов различного назначения, в особенности тех, полезная нагрузка которых представляет собой измерительные системы: активные и пассивные радиолокаторы, средства наблюдения и дистанционного зондирования, навигационные устройства и др. Особое значение координатно-временное обеспечение имеет в случаях совместного функционирования нескольких космических аппаратов, которые решают общую задачу.

Для функционирования на разных типах орбит (низких, геостационарных, высокоэллиптических) необходимо использовать несколько антенн (антенно-фидерных систем), которые посредством коммутатора подключаются к приёмнику сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). К тому же коммутатор выполняет ещё и функцию защиты входных цепей приёмника от электростатических разрядов.

Малошумящий усилитель (МШУ) в приёмном тракте выполняет первый этап усиления слабого принятого сигнала. От его линейности, шумовых и усилительных свойств зависят итоговые характеристики всего приёмника [1].

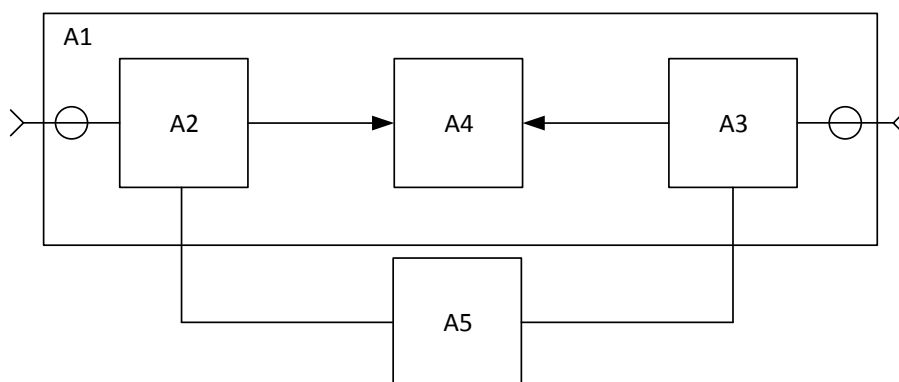


Рис. 1. Схема подключения объекта испытаний: A1 – зондовая станция Suss Micro Tec 200m; A2, A3 – СВЧ зонды Z040-K3N-GSG-150; A4 – объект испытаний; A5 – источник питания Agilent E 3646A

В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований электрических характеристик радиационнстойких монолитно-интегральных схем (МИС) компонентов, а именно двухпозиционного коммутатора и МШУ, для применения в составе многоканальных ГНСС приёмников L-диапазона частот, разработанных и изготовленных на основе арсенид-галлиевой технологии собственного производства.

Ближайший зарубежный аналог GaAs МИС двухпозиционного коммутатора – HMC190AMS8 производства компании Hittite Microwave (США) [2]. Ближайший отечественный аналог GaAs МИС двухпозиционного коммутатора – MP202 производства ЗАО «НПФ «Микран» (г. Томск) [3].

Ближайший зарубежный аналог GaAs МИС МШУ – HMC618LP3 производства компании Hittite Microwave (США) [4]. Ближайший отечественный аналог GaAs МИС МШУ – MP502 производства ЗАО «НПФ «Микран» (г. Томск) [5].

В дальнейшем на основании полученных результатов экспериментальных исследований планируется интеграция МШУ и двухпозиционного коммутатора на общий кристалл (Итерация 2).

Общим условием при проведении экспериментальных исследований являлось то, что измерение электрических характеристик кристаллов МИС проводили непосредственно на полупроводниковой пластине с помощью зондовой станции Suss Micro Tec 200m.

Схема измерения на основе зондовой станции приведена на рис. 1.

Двухканальный источник питания Agilent E 3646A служит для установки режима по постоянному току объектов испытаний.

### Исследования МИС МШУ

Основными техническими характеристиками МИС МШУ TSR057 (ТУСУР) являются: коэффициент шума, коэффициент передачи, частотный диапазон, выходная мощность по сжатию коэффициента передачи на 1 дБ и ток потребления.

Измерение коэффициента шума МИС МШУ TSR057 (ТУСУР) проводили с помощью панорамного измерителя коэффициента шума Agilent N 8975A, позволяющего производить из-

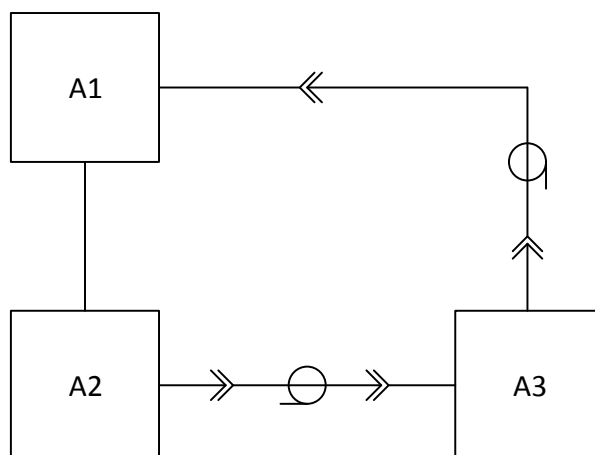


Рис. 2. Схема измерения коэффициента шума: A1 – измеритель коэффициента шума Agilent N 8975A; A2 – генератор шума Agilent N4002A; A3 – МИС МШУ

мерения в частотном диапазоне от 10,0 МГц до 26,5 ГГц. Погрешность измерения в диапазоне частот  $\leq 3$  ГГц не превышает 0,05 дБ.

Схема измерения коэффициента шума с помощью Agilent N 8975A изображена на рис. 2.

Прибор Agilent N 8975A основан на методе Y-фактора с коррекцией, являющемся основным методом для СВЧ-измерителей шума. Полное измерение коэффициента шума в данном случае состоит из двух шагов. Первый шаг называется калибровкой, которая производится без измеряемого устройства. На вход измерителя коэффициента шума подключают генератор шума (ГШ) с калиброванным значением избыточного коэффициента шума (ENR). В нашем случае использован ГШ фирмы Agilent N 4001A, основанный на эффекте возникновения шумового сигнала при лавинном пробое p-n-перехода диода, имеющий ENR от 4,5 до 6,0 дБ. При калибровке в прибор вводят таблицу ENR в точках частотного диапазона согласно маркировке ГШ. Для прибора Agilent N 8975A эта операция осуществляется автоматически, без участия оператора.

При проведении калибровки измеряют Y-фактор, который определяется как отношение выходной мощности шума при включенном («On») и выключенном («Off») состоянии ГШ, а также шумовых температур, соответствующих данным режимам. Используя соотношение

$$F_{ш} = ENR / (Y-1) \quad (1)$$

и

$$ENR = 10 \lg[(T_1 - T_2) / T_0], \quad (2)$$

где  $T_1$  – шумовая температура при включенном ГШ;  $T_2$  – шумовая температура при выключенном ГШ;  $T_0 = 290$  К – опорная шумовая температура, определяют коэффициент шума прибора. В конце калибровки прибор сохраняет измеренные значения и приводит кривые изменения коэффициента шума к номинальному значению 0 дБ. После этого прибор готов к измерению электрических характеристик МИС МШУ TSR057 (ТУСУР).

Следующим после калибровки шагом является включение измеряемого устройства в разрыв между генератором шума и прибором и повторное измерение коэффициента шума методом У-фактора. При этом коэффициент шума измеряемого устройства определяется из условия

$$F_1 = F_S - (F_2 - 1) / K_P, \quad (3)$$

где  $F_1$  – коэффициент шума МИС МШУ;  $F_S$  – коэффициент шума системы, состоящей из каскадного соединения МИС МШУ и прибора;  $F_2$  – коэффициент шума прибора;  $K_P$  – коэффициент усиления МИС МШУ.

Представленный метод измерения позволяет с высокой точностью определять коэффициент шума в широком частотном диапазоне. Как уже отмечалось, в диапазоне до 3 ГГц погрешность измерения не превышает 0,05 дБ. При этом результаты измерения выводятся на экран прибора в виде численных значений и панорамных графиков.

В ходе проведения экспериментальных исследований были измерены опытные образцы МИС МШУ TSR057 (ТУСУР). Результаты измерения показали, что коэффициент шума МИС МШУ имеет значения в пределах от 2,0 до 2,5 дБ, что превосходит отечественный аналог (4,5 дБ), но уступает зарубежному (0,85-1,1 дБ). Это в первую очередь связано с технологией изготовления, в которую будут внесены соответствующие коррекции для достижения требуемого значения при следующей (второй) итерации.

Измерение коэффициента передачи и частотных характеристик МИС МШУ проводили с помощью векторного анализатора цепей Agilent N524 2AS, который относится к серии PNA-X. Отмеченный прибор позволяет измерять значительное число параметров (АЧХ, КСВ, ФЧХ, ГВЗ, интермодуляционные искажения и т.д.) в частотном диапазоне от 10,0 МГц до 26,5 ГГц. Схема измерения АЧХ коэффициента передачи МИС МШУ представлена на рис. 3.

Перед проведением измерений, как и для измерения коэффициента шума, осуществляется калибровка прибора с устранением влияния адаптера (зондовой станции). Кроме того, методы калибровки предполагают коррекцию ошибок рассогласования на входе и выходе при измере-

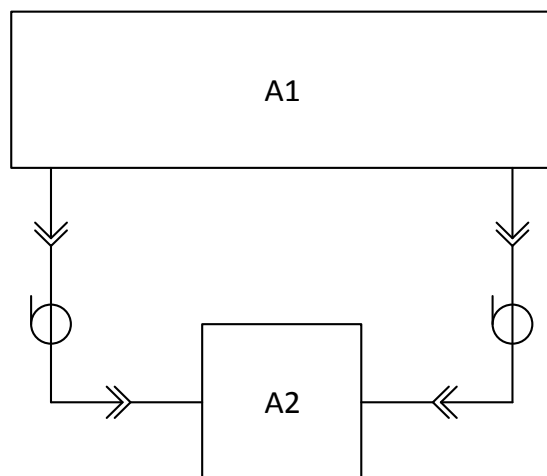


Рис. 3. Схема измерения АЧХ коэффициента передачи: A1 – векторный анализатор цепей Agilent N524 2AS; A2 – МИС МШУ

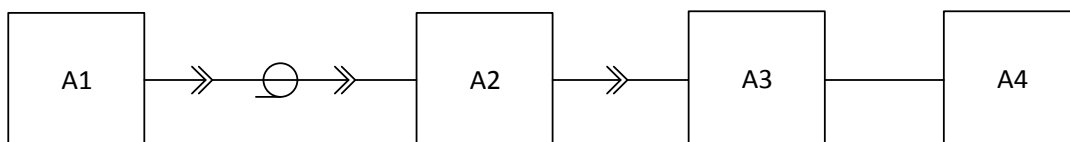


Рис. 4. Структурная схема измерения выходной мощности по критерию сжатия коэффициента передачи на 1 дБ: А1 – СВЧ-генератор; А2 – СВЧ-усилитель МАНВ 020200; А3 – МИС МШУ; А4 – ваттметр Agilent N1911А

ниях параметров передачи, что значительно уменьшает неравномерность частотной характеристики и улучшает точность измерения, которая для коэффициента передачи  $\leq 0,047$  дБ.

Было проведено измерение зависимостей АЧХ коэффициента передачи опытных образцов МИС МШУ TSR057 (ТУСУР). При этом величина коэффициента передачи изменялась в пределах 23-25 дБ, что существенно превосходит как отечественные (18-20 дБ), так и зарубежные (19 дБ) показатели. Частотный диапазон составил от 1,0 (нижняя граничная частота) до 2,5 ГГц (верхняя граничная частота) при значениях рассматриваемых аналогов: MP502 – от 1 до 4 ГГц, НМС618LP3 – от 1,2 до 1,7 ГГц.

Измерение выходной мощности по критерию сжатия коэффициента передачи на 1 дБ проводили в соответствии со структурной схемой измерения, изображенной на рис. 4.

В качестве СВЧ-генератора был использован СВЧ-выход анализатора цепей Agilent N524 2AS, который имеет при выходной мощности 0 дБмВт очень низкий уровень гармонических составляющих (минус 60 дБ). СВЧ-усилитель МАНВ-020200 фирмы «Микран» служит для развязки и раскачки выходного сигнала генератора.

Выходную мощность измеряют СВЧ-ваттметром Agilent N1911А, работающим в частотном диапазоне от 50 МГц до 18 ГГц. Пределы измерения выходной мощности от  $0,3 \cdot 10^{-7}$  Вт до 0,1 Вт при относительной погрешности  $\pm 5\%$ .

В начале измерения устанавливают относительно малый уровень входного воздействия (минус 40 дБмВт) и определяют малосигнальный коэффициент передачи по мощности:

$$K_p(\text{дБ}) = 10 \cdot \lg(P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}). \quad (4)$$

По мере увеличения входной мощности за счёт нелинейных эффектов происходит уменьшение (сжатие) коэффициента передачи. Линейным считается режим, при котором сжатие коэффициента передачи не превышает 1 дБ. Для МИС МШУ TSR057 (ТУСУР) по отмеченной методике были определены уровни выходной мощности, соответствующие снижению  $K_p$  на 1 дБ, которые составили 14,0-14,8 дБм во всём частотном диапазоне. Данная величина соответствует показателю для отечественного (13,5 дБм) и зарубежного (14,5-10,0 дБм) аналогов.

Ток потребления, который фиксировался источником питания Agilent E 3646А, не превышал порог в 50 мА при соответствующем показателе MP502 в 80 мА и НМС618LP3 в 118-65 мА.

### Исследования МИС двухпозиционного коммутатора

Основными техническими характеристиками МИС двухпозиционного коммутатора TSR028 (ТУСУР) являются: вносимые потери открытого и закрытого канала, частотный диа-

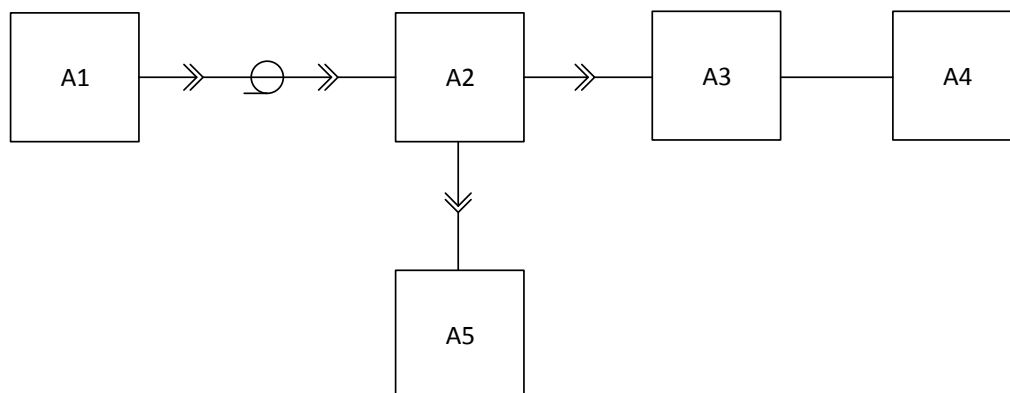


Рис. 5. Схема измерения вносимых потерь двухпозиционного коммутатора: A1 – СВЧ-генератор; A2 – двухпозиционный коммутатор; A3 – СВЧ-усилитель МАНW-020200; A4 – ваттметр Agilent N1911A; A5 – нагрузка 50 Ом

пазон, возвратные потери (коэффициент стоячей волны, КСВ), входная мощность по сжатию коэффициента передачи на 1 дБ, ток потребления.

Измерение основных характеристик МИС двухпозиционного коммутатора производится с помощью приборов, используемых и при измерении МИС МШУ. Отличительной особенностью признано то, что при проведении измерений передаточных характеристик открытого и закрытого канала необходимо подключение пятидесятиомной нагрузки в канал, не используемый для прохождения сигнала. Для её подключения применяют дополнительный СВЧ-зонд. Схема измерения вносимых потерь приведена на рис. 5.

Измерение вносимых потерь открытого канала производится при низком входном уровне СВЧ-генератора (минус 40 дБм). Чтобы не допустить дополнительных нелинейных искажений, СВЧ-усилитель из схемы измерения исключается. Потери определены в соответствии с выражением (4) и составили для всех образцов не более 0,5 дБ, что соответствует отечественному и зарубежному уровням.

Для закрытого канала вначале производится калибровка коэффициента передачи вместе с СВЧ-усилителем, а затем определяется суммарный коэффициент передачи, из которого исключается коэффициент усиления усилителя. В ходе проведенных измерений вносимые потери закрытого канала для всех образцов были более 40,5 дБ, что соответствует значению показателя для отечественного аналога (43-38 дБ) и существенно (в 1,8 раза) превышает для зарубежного (23 дБ).

Частотный диапазон составил от 0,1 (нижняя граничная частота) до 1,8 ГГц (верхняя граничная частота) при значениях рассматриваемых аналогов: МР202 – от 1 до 8 ГГц, НМС190АМС8 – от 0 до 3 ГГц.

Возвратные потери измеряли непосредственно с помощью векторного анализатора цепей Agilent N524 2AS по схеме, представленной на рис. 3. Как уже отмечалось, Agilent N524 2AS позволяет измерять значительное число параметров, в том числе возвратные потери (КСВ). Проведенные испытания показали, что возвратные потери для всех образцов изменялись в пределах минус 16 – минус 17 дБ, что на 8-3 дБ меньше, чем у зарубежной GaAs МИС (24-20 дБ), и на 6-7 дБ больше, чем у отечественной.

Входная мощность по сжатию коэффициента передачи на 1 дБ измерена для открытого канала по схеме, представленной на рис. 5, и составила не менее 16 дБм, что на 7-9 дБ ниже, чем у HMC190AMS8 (25-23 дБм) и MP202 (23 дБм).

Ток потребления, который фиксировался источником питания Agilent E 3646A, не превышал порога в 40 мкА при соответствующем показателе MP202 в 50 мкА.

### Заключение

Таким образом, экспериментальные испытания показали, что разработаны схемотехнические и топологические решения экспериментальных образцов МИС двухпозиционного коммутатора и МШУ L-диапазона частот на основе собственной (НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУР) GaAs pHEMT-технологии с параметрами, за исключением коэффициента шума, на уровне современных аналогов (табл. 1) для применения в составе многоканальных ГНСС приёмников.

Коэффициент шума разработанной GaAs МИС МШУ TSR057 (ТУСУР) уступает зарубежному аналогу. Возможные причины [6]:

- большая проводимость металлизации в сравнении со значением, принятым при проектировании. Как следствие, высокие потери во входной согласующей цепи, которые не могут быть компенсированы;
- несоответствие шумовой модели транзистора.

Таблица 1. Сводная таблица электрических характеристик разработанных МИС и их аналогов

	Наименование параметра, единица измерения	Значение					
		HMC618LP3		MP502		TSR057	
		Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.
МИС МШУ	Граница рабочей полосы частот, ГГц	1,2	1,7	1	4	1,0	2,5
	Коэффициент усиления, дБ	19	–	18	20	23	25
	Коэффициент шума, дБ	0,85	1,1	–	4,5	2,0	2,5
	Выходная мощность при сжатии КП на 1 дБ, дБм	10,0	14,5	13,5	–	14,0	14,8
	Напряжение питания, В	3	5	–	5	–	5
	Ток потребления, мА	65	118	–	80	45	50
МИС коммутатора		HMC190AMS8		MP202		TSR028	
	Граница рабочей полосы частот, ГГц	0	3	1	8	0,1	1,8
	Вносимые потери открытого канала, дБ	–	0,6	0,3	0,6	–	0,5
	Вносимые потери закрытого канала, дБ	23	–	38	43	40,5	–
	Входная мощность при сжатии КП на 1 дБ, дБм	23	25	23	–	16	–
	Возвратные потери, дБ	20	24	10	–	16	17
	Управляющее напряжение, В	0	3...8	0	3,3...5	0	5
	Ток потребления, мкА	–	–	–	50	–	40



Для устранения указанного недостатка в дальнейшем планируется:

- провести измерения тестовых пассивных элементов (отрезок микрополосковой линии, спиральная катушка индуктивности) и уточнить значение удельной проводимости металлизации. Результаты использовать в процессе интеграции малошумящего усилителя и двухпозиционного коммутатора на общий кристалл (Итерация 2);
- провести измерения параметров тестовых транзисторов в различных режимах по постоянному току. Определить режим работы, соответствующий минимальному коэффициенту шума. Уточнить шумовую модель транзистора. Результаты использовать в процессе интеграции малошумящего усилителя и двухпозиционного коммутатора на общий кристалл (Итерация 2).

***Работа выполнена в «НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУР в рамках реализации постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 и договора между ОАО «ИСС» и Минобрнауки РФ от 12.02.2013 № 02.Г 25.31.0042 [7].***

#### **Список литературы**

- [1] Дмитриев В.Д., Терешков В.В., Саяпин В.Ю. // Доклады ТУСУР. 2014. № 3(33). С. 16–21.
- [2] HMC190AMS8/190AMS8E – GaAs MMIC SPDT Switch DC–3 GHz [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radiant.su/other/hittite/pdf/hmc190ams8.pdf>, свободный (дата обращения: 10.06.2013).
- [3] GaAs МИС двухпозиционного СВЧ-коммутатора MP202 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.micran.ru/productions/MIS/switches/MP202>, свободный (дата обращения: 10.06.2013).
- [4] HMC618LP3/618LP3E – GaAs SMT pHEMT Low Noise Amplifier, 1.2 – 2.2 GHz [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radiant.su/other/hittite/pdf/hmc618lp3.pdf>, свободный (дата обращения: 10.06.2013).
- [5] GaAs МИС широкополосного усилителя 1-4 ГГц MP502 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.micran.ru/productions/MIS/amplifiers/MP502>, свободный (дата обращения: 10.06.2013).
- [6] Зыков Д.Д., Матвеев В.В., Нечаев К.А., Карабан В.М. // Доклады ТУСУР. 2013. № 4(30). С. 173–176.
- [7] Куприц В.Ю., Шарыгин Г.С., Школьный В.Н. // Доклады ТУСУР. 2014. № 3(33). С. 22–26.